



高等学校统编教材

自动控制基础

余允初 主编

国防工业出版社

自动控制基础

余允初 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书讲述线性定常连续自动控制系统的工作原理、设计方法（频率法和根轨迹法）和实验技术，简要地介绍了非线性系统的特点和分析方法。为了仪表和计算机类专业的需要，还讲述了线性离散系统的工作原理、特点和分析、设计方法。为便于非电类专业人员学习的需要，书后附有拉普拉斯变换和部分常用电气自动控制元件的工作原理和特性。

本书可作为高等工科院校非自控专业和自控专业短训班的教材，也可作为工程技术人员自学用书。

自动控制基础

余允初 主编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 23 539千字

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷 印数：00,001—11,000册

统一书号：15034·2911 定价：4.25元

前 言

本书是中国船舶工业总公司教材编审会议确定的统编教材，是在哈尔滨工业大学非自控专业《自动控制原理》课程的通用教材基础上，根据该校几期使用的经验和兄弟院校的意见、要求，对原书内容作了增减、修改写成的。本书在讲述方法上注意了简明扼要、通俗易懂；在内容上注意了各专业的通用性和便于不同教学时数的取舍。

为便于非电类专业人员学习的需要，书后附有拉普拉斯变换和部分电气自动控制元件的工作原理和特性。为了帮助读者掌握和运用所学理论，除每章均有一定数量的例题和典型控制系统设计举例外，在每章之后还附有相当数量的习题，可供练习。

本书由哈尔滨工业大学自动控制理论教研室余允初任主编，参加编写的有鄢景华（1～4章及附录），余允初（5～8章）和裴润（9～10章）等同志。哈尔滨船舶工程学院侯业和副教授主审。

在编写过程中，得到了哈尔滨工业大学自控理论教研室和兄弟院校许多同志的大力支持，在此深表感谢。

由于编者水平有限和时间仓促，书中定有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

于哈尔滨工业大学

目 录

第一章 控制系统的一般概念	1	§ 6-1 根据系统的开环频率特性 分析系统过渡过程的性能	157
§ 1-1 自动控制与自动控制系统 的基本概念	1	§ 6-2 控制系统性能的校正	164
§ 1-2 开环控制与闭环控制	4	习题	188
§ 1-3 控制系统举例	5	附录6-1 公式(6-17)、(6-38) 的证明	190
§ 1-4 控制系统的组成与对控制系统 的基本要求	17	附录6-2 常用校正装置表	195
习题	19	第七章 根轨迹法	198
第二章 控制系统的传递函数	22	§ 7-1 控制系统的根轨迹	198
§ 2-1 控制系统运动方程式的列写	22	§ 7-2 绘制根轨迹的基本规则	203
§ 2-2 非线性运动方程式的线性化	29	§ 7-3 按根轨迹分析控制系统	217
§ 2-3 传递函数	36	§ 7-4 用根轨迹法校正系统的性能	221
§ 2-4 控制系统的传递函数	42	习题	234
§ 2-5 控制系统的方块图及其简化	46	第八章 非线性系统	235
习题	54	§ 8-1 典型非线性特性	235
第三章 控制系统的过渡过程	60	§ 8-2 分析非线性系统的描述函数法	237
§ 3-1 典型输入信号	60	§ 8-3 分析非线性系统的相平面法	247
§ 3-2 一阶系统的过渡过程	63	习题	264
§ 3-3 二阶系统的过渡过程	67	第九章 控制系统的设计和 试验	267
§ 3-4 高阶系统的过渡过程	87	§ 9-1 设计控制系统的一般步骤	267
§ 3-5 控制系统的稳定性	95	§ 9-2 小功率随动系统设计举例	268
习题	100	§ 9-3 控制系统数学模型的测试	280
第四章 控制系统的稳态误差	104	§ 9-4 控制系统的模拟试验	288
§ 4-1 稳态误差的基本概念	104	第十章 线性离散控制系统	301
§ 4-2 稳态误差的计算	105	§ 10-1 离散控制系统概述	301
§ 4-3 消除和减少稳态误差的办法	113	§ 10-2 离散控制系统的数学描述	304
习题	121	§ 10-3 Z变换	307
第五章 频率特性及稳定判据	125	§ 10-4 脉冲传递函数	315
§ 5-1 频率特性	125	§ 10-5 离散控制系统的品质分析	324
§ 5-2 系统的开环频率特性	128	§ 10-6 离散控制系统的校正与设计	332
§ 5-3 奈魁斯特稳定判据	143	习题	343
§ 5-4 控制系统的稳定裕量	152	附录一 拉氏变换	344
习题	155	附录二 自动控制元件	350
第六章 用频率特性法分析和校 正控制系统的性能	157	主要参考书目	364

第一章 控制系统的一般概念

随着生产和科学技术的发展,自动控制在国民经济和国防建设中所起的作用越来越大。例如,没有一整套自动控制系统,一个现代化的热力发电厂的锅炉、汽轮机和发电机就无法正常地运转。又如,为使导弹能准确地命中目标,人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地月球着陆,并重返地球,这些都要有很复杂的自动控制系统予以保证才行。

在工业生产过程中,诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制,都要应用自动控制技术。

自动控制技术的应用,不仅使生产过程实现了自动化,极大地提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都起着极为重要的作用。因此,自动控制技术成为实现工业、农业、科学技术和国防现代化所必不可少的一门技术。

《自动控制基础》是一门技术基础课程,主要讲述自动控制原理与控制系统设计、试验等内容。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制原理可分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。

古典控制理论的内容主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论研究较早,现在已经成熟,并在工程实践中得到广泛的应用。本书将主要介绍这部分内容。

现代控制理论是六十年代在古典控制理论的基础上,随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的。它的内容主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统识别、自适应控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制等方面有了重大发展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的发展而日新月异地向前发展着。

§ 1-1 自动控制与自动控制系统的基本概念

首先,通过举例来说明有关自动控制与自动控制系统的基本概念。

机电工业中常用的原材料——硅钢片在热处理过程中需要进行10小时连续保温680°C后,才能达到预期的性能。这就需要对退火炉的温度进行控制。

设有一个电炉(见图1-1),用调压器对电炉供电,使其温度升高到680°C,并保持不变,即控制炉温 $T = T_0 = 680^\circ\text{C}$ 。但实际上有很多干扰因素要引起炉温发生变化,如电源电压的波动、车间环境温度的变化等。要想保持炉温不变,必须设法抵消或削弱这些干扰因素的影响。这种抵消或削弱干扰因素的过程就是对炉温的控制过程。

对炉温的控制可以由人工来完成(见图1-2)。其控制的具体过程如下:

1. 通过温度表观察由热电偶测出的炉温;

2. 与要求的温度值进行比较, 得出偏差;

3. 根据偏差的大小和正负进行控制: 若炉温高于 680°C , 则朝着减小加热电流的方向转动调压器手柄, 使炉温降到所要求的数值; 若炉温低于 680°C , 则朝着加大加热电流的方向转动调压器手柄, 使炉温升到所要求的数值; 若炉温处于 680°C , 则不动调压器。

可见, 在上述人工控制过程中, 必须有一个测量元件(如测量温度的热电偶)和一个受人工操作的元件(如调压器)。人在控制过程中起了比较、判断、操作的作用, 所以人工控制过程的实质, 就是“检测偏差, 纠正偏差”的过程。

人固然能完成上述控制炉温的任务, 但随着生产的发展, 需

要控制的任务越来越多, 样样都由人们亲自去完成, 实不胜应付, 况且用人眼观测存在误差, 用手去执行也不准确等, 因此有些控制任务单凭人们的感觉器官是不能很好完成的。随着科学技术的发展, 人们已经设计和制造出很多精密、灵巧、具有很高工作效能的仪器, 可代替人工去完成一部分工作, 从而实现自动控制。

所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下, 通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。图1-3就是一个电炉炉温自动控制系统的原理图。

在这里, 我们定义用以完成一定任务的一些部件(或元件)的组合为系统。在炉温控制系统中, 电炉是被控制的, 叫做系统的**被控制对象**。除了被控制对象之外的各个部分的组合叫做**控制器**。控制器给被控制对象以适当的控制作用来完成特定的任务。如在炉温控制系统中, 就是要完成使炉温维持恒定的任务。

下面就来分析图1-3所示系统是如何用仪器设备来代替人工完成炉温自动控制的问题。

图中的热电偶用来测量炉温, 它的输出电压 u_2 正比于炉温 T , 即 $u_2 = K_2 T$ 。热电偶完成了测量炉温并把炉温转换为相应电压的任务, 故称为**测量元件**。炉温 T 被定义为系统的**被控制量**或**输出量**。对任何一个控制系统来说, 被控制量是极为重要的物理量, 它的变化规律在生产过程中要严加控制。电压 u_2 与被控制量成比例, 在自动控制系统中它

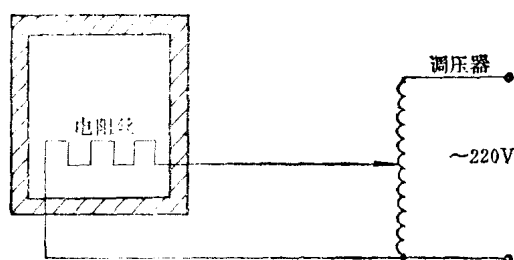


图1-1 电炉

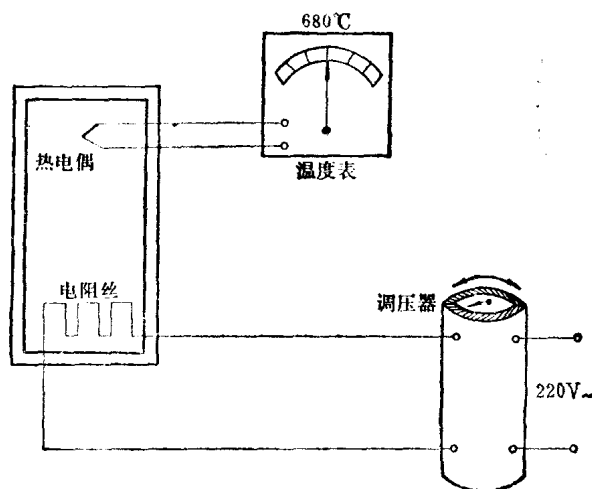


图1-2 电炉炉温人工控制系统

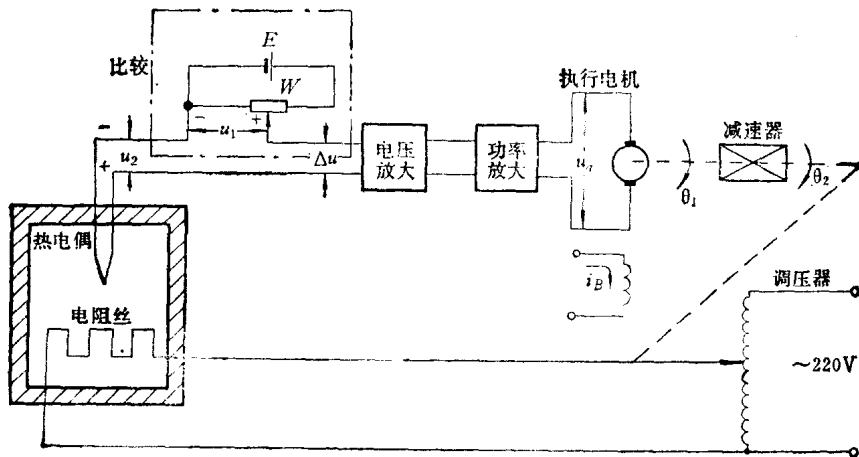


图1-3 电炉炉温自动控制系统

被称为反馈量（或叫反馈信号）。

电压 u_1 为给定的基准电压，其设置值与炉温的期望值相对应。称电压 u_1 为系统的控制量或输入量。控制量代表了系统所要执行的命令，即它控制被控制量按一定的规律变化。而所有妨碍控制量对被控制量按要求进行正常控制的因素（如电网电压的波动、炉子周围环境温度的变化及系统内部参数变化等）被定义为系统的干扰量（或干扰信号）。基准电压 u_1 是由电源 E 及电位计 W 给出的，称电源及电位计为给定元件。

将反馈量 u_2 反馈到系统的输入端与控制量 u_1 进行比较（这代替了人工去观察炉温并判断是否与要求值发生偏差这一过程）后得到的电压差 $\Delta u = u_1 - u_2$ 叫做偏差量（或偏差信号）。如果偏差信号不为零，即 $\Delta u \neq 0$ ，便意味着炉温偏离了要求的值。

图中的电压放大器、功率放大器统称为放大元件，它的作用是将很小的偏差信号 Δu 进行放大，使放大后的信号 u_a 具有足够的能量并选择适当的极性去驱动直流电动机。

现在，我们来分析一个具体的控制过程。假如某种原因使炉温 T 高于要求的炉温值 T_0 ，即 $T > T_0$ ，则有 $u_1 < u_2$ ，得偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2 < 0$ 。这里， u_1 和 u_2 的比较代替了人工对于炉温偏高偏低的判断。偏差信号 Δu 经放大后将控制直流电动机产生角位移，并通过减速器带动调压器手柄朝减小加热电流的方向转动，使炉温 T 及反馈信号 u_2 下降，进而使偏差信号 Δu 及放大器输出信号 u_a 下降。直到 $u_1 = u_2$ ，偏差信号 $\Delta u = 0$ ， $u_a = 0$ 时，电动机停止转动，电炉的温度恢复到要求的数值。此时系统达到新的平衡状态，从而完成了一个控制过程。

从上看出，直流电动机起着执行控制任务的作用，把它叫做执行元件。放大器和直流电动机的工作代替了人工用手按正确方向转动调压器手柄的工作。可见，对炉温的控制完全是在没有人参与的情况下自动进行的。因此，把这种不需要人直接参与，而使被控制量自动地按预定规律变化的控制过程叫做自动控制。

为了便于研究，可把实际的物理系统按信号传递过程画成如图1-4所示的方块图。

图1-4中圆叉号代表比较元件，负号表示两信号相减，一般地说，比较元件的输出信号等于各输入信号的代数和。

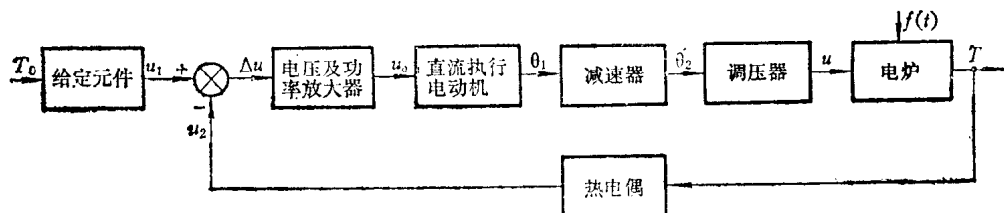


图1-4 炉温自动控制系统方块图

从图1-4可以明显看出,产生控制作用的关键是偏差信号,只有当偏差信号不为零时才存在控制过程,当偏差信号为零时控制过程就将结束。而偏差信号是对被控制量不断测量转换并反馈到系统的输入端与控制量相减(即负反馈)而得到的。这种利用负反馈得到偏差信号,从而产生控制作用,又去消除偏差的控制原理叫做**反馈控制原理**。由于有了负反馈,自动控制系统便形成了一个按偏差进行控制的闭环系统(又称反馈控制系统)。

由于炉温控制系统具有能源,所以图1-4所示的反馈控制系统是一个**有源闭环控制系统**。

因此,严格地说,自动控制系统是一个力图使控制信号与被控制信号之间保持给定函数关系的具有能源和负反馈的闭环系统。

需要说明,实际生产工艺对参数要求控制的精度总是有限的,同时系统中各组成部分都有些不灵敏区,因此不必也不会一有偏差就使电动机转动,进行控制。上述系统只是一个能完成 $\pm 5^\circ\text{C}$ 控制精度的炉温控制系统,即控制炉温维持在 $680 \pm 5^\circ\text{C}$ 范围内。

在本书中,控制量用 $r(t)$ 来表示;被控制量用 $c(t)$ 来表示;偏差量用 $e(t)$ 来表示;干扰量用 $f(t)$ 来表示。

§ 1-2 开环控制与闭环控制

在上一节中主要结合闭环控制系统说明自动控制的基本概念并引出常用名词术语,但在生产实践中还常常碰到开环控制系统。下面就说明开环控制与闭环控制的特点及主要优缺点。

开环控制 若系统的被控制量对系统的控制作用没有影响,则此系统叫**开环控制系统**。用方块图表示如图1-5所示。



图1-5 开环控制系统

在开环控制系统中,既不需要对被控制量进行测量,也不需要将被控制量反馈到系统的输入端与控制量进行比较。这样,对于一个确定的控制量就有一个与之对应的被控制量。因此,系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳定性。也就是说,欲使开环控制系统具有满足要求的控制精度,则系统各部分的参数值,在工作过程中,都必

须严格保持在事先校准的量值上,这就必须对组成系统的元部件的质量提出严格的要求。

当出现干扰时,开环控制系统就不能完成既定的控制任务,因为开环控制系统不能辨认是起控制作用的控制信号还是妨碍控制作用的干扰信号,只要有外加的输入信号就会引起被控制信号的变化(系统内部参数的变化同样会引起不需要的被控制信号的变化)。这就是说开环控制系统没有抗干扰能力。

闭环控制 凡是系统的被控制信号对控制作用有直接影响的系统都叫闭环控制系统,如图1-6所示。

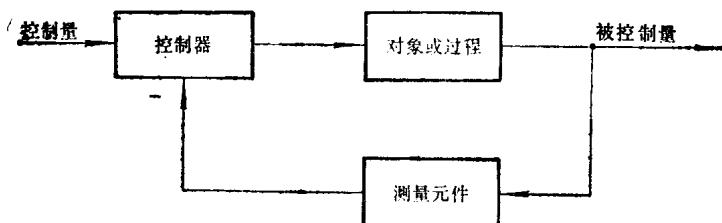


图1-6 闭环控制系统

在闭环控制系统中,需要对被控制信号不断地进行测量、变换并反馈到系统的控制端与控制信号进行比较,产生偏差信号,实现按偏差控制。如在上节中介绍的炉温控制系统就是闭环控制系统。

由于闭环控制系统采用了负反馈,使系统的被控制信号对外界干扰和系统内部参数的变化都不敏感,即闭环控制抗干扰能力强。这样,就有可能采用不太精密的成本低的元部件,构成精确的控制系统。而开环控制系统则做不到这一点。

从系统的稳定性来考虑,开环控制系统容易解决,因而不是十分重要的问题。但对闭环控制系统来说,稳定性始终是一个重要问题。因闭环控制系统可能引起超调,从而造成系统振荡,甚至使得系统不稳定。

开环控制系统结构简单,容易建造,成本低廉,工作稳定。一般说来,当系统控制量的变化规律能预先知道,并且对系统中可能出现的干扰,可以有办法抑制时,采用开环控制系统是有优越性的,特别是被控制量很难进行测量时更是如此。目前,用于国民经济各部门的一些自动化装置,如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线及自动车床等,一般都是开环控制系统。用于加工模具的线切割机也是开环控制的很好一例。只有当系统的控制量和干扰量均无法事先预知的情况下,采用闭环控制系统才有明显的优越性。

如果要求实现复杂而准确度较高的控制任务,则可将开环控制与闭环控制适当结合起来,组成一个比较经济而性能较好的控制系统。

§ 1-3 控制系统举例

一、随动系统

在闭环控制系统中,如果控制信号为一任意时间函数,其变化规律无法预先予以确定,则承受这类控制信号的闭环控制系统叫做**随动系统**。

例1-1 炮瞄雷达天线随动系统。

炮瞄雷达天线随动系统的原理线路如图1-7所示。这个系统有两种工作状态：一种是当雷达天线还没有扑捉到飞机时，要由雷达手操作使天线旋转去搜索飞机，这时线路图上的刀闸开关 K 合在位置“1”上；第二种状态是，当天线扑捉到目标后，把刀闸开关 K 立即合向位置“2”，这时，系统依靠雷达接收机工作在自动跟踪状态，雷达天线自动跟踪飞机的运动。下面分别讨论系统的这两种工作状态。

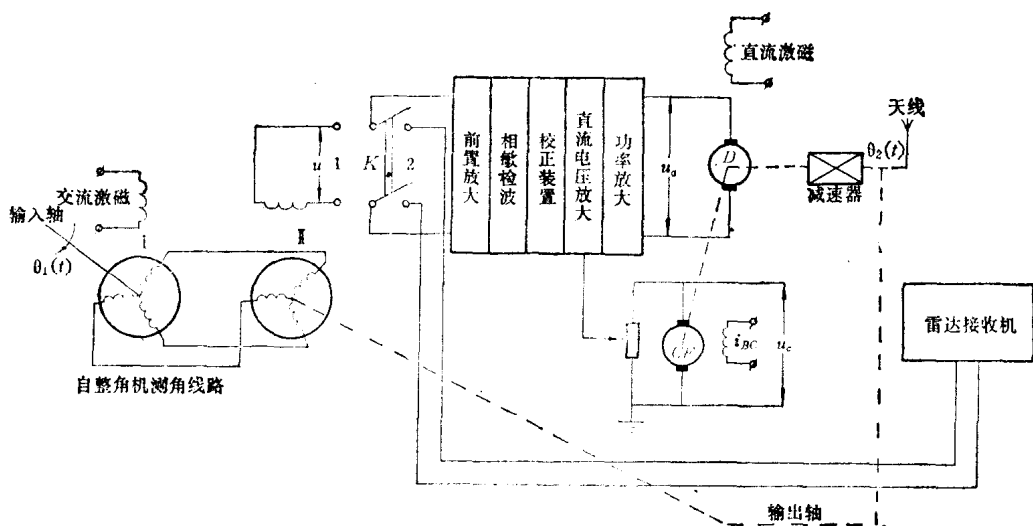


图1-7 炮瞄雷达天线随动系统原理图

1. 炮瞄雷达天线随动系统的搜索状态

在搜索敌机时，我们希望雷达天线按照要求在空中旋转。由于雷达天线又大又重，人是摇不动的。同时雷达天线不能安装在雷达机房里，因此不可能用人工来摇动天线搜索飞机，需要借助随动系统来帮忙。这时将刀闸 K 打到“1”。

图1-7中“Ⅰ”为自整角发送机，它的转子轴与系统输入轴相固联；“Ⅱ”为自整角接收机，它的转子轴与天线轴相固联，此轴为系统的输出轴。这一对自整角机组成测角线路（工作原理见附录二），测量出系统的输入轴与输出轴之间的角差并转换成相应的电压，其输出电压的大小由角差的大小决定，而输出电压的相位由角差的符号决定，即

$$u = K_1(\theta_1 - \theta_2) = K_1 \Delta\theta$$

式中 K_1 ——自整角机的传递系数，量纲为伏/密位。

系统的执行元件为一直流伺服电动机，由功率放大器的输出信号 u_a 来控制。直流电动机的转轴经减速器带动被控制对象（雷达天线）。

下面说明随动系统的工作原理：

假设随动系统已调好，处于平衡状态，即 $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ ，故 $u = 0$ ， $u_a = 0$ ，直流执行电动机不动，雷达天线亦不动。

若自整角发送机转子顺时针转过 10° ，则角差 $\Delta\theta = 10^\circ$ ，使 $u \neq 0$ ，此信号经相敏检波变成直流信号，并经功率放大使 u_a 具有足够的功率去驱动直流伺服电动机转动， u 的极性决定电动机经减速器带动天线顺时针旋转，当天线转过 10° 时，由于自整角接收

机与天线同轴相联, 接收机转子也顺时针转 10° , 使得 $\theta_2 = \theta_1 = 10^\circ$, 即 $\Delta\theta = 0^\circ$, $u_a = 0$, 电动机及天线停止转动。

反之, 若自整角发送机转子逆时针转 10° , 则天线亦逆时针转 10° 。

若自整角发送机转子连续转动, 则天线也跟着发送机转子按相同方向连续转动。这样天线的轴就始终跟随自整角发送机的轴转动, 从而实现被控制量 $\theta_2(t)$ 始终自动而准确地复现控制量 $\theta_1(t)$ 的变化规律。

自整角发送机的转子可以由雷达手摇动装在轴上的手柄使其转动, 亦可用其它电动机带动发送机转子转动。

随动系统工作在搜索状态的方块图如图1-8所示。

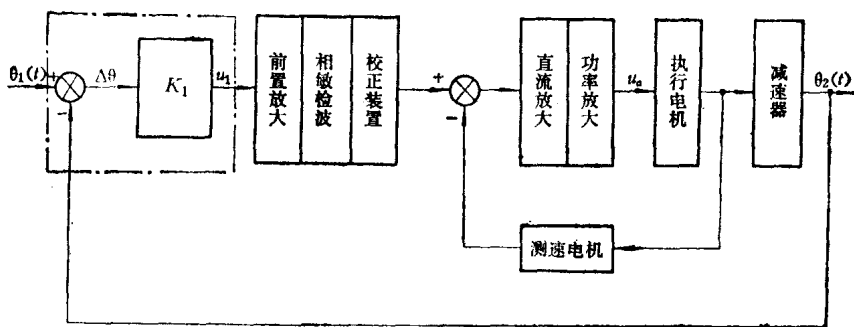


图1-8 随动系统工作在搜索状态的方块图

2. 炮瞄雷达天线控制系统的自动跟踪状态

当雷达手从示波器的荧光屏上看到雷达已经扑捉到飞机之后, 马上把刀闸 K 合向位置“2”, 使控制系统进入自动跟踪状态。此时系统的任务是随时测量空中目标(如飞机)的方位角(或俯仰角), 使目标始终在天线轴线上。因此系统的输入信号就是目标的方位角(或俯仰角)的数值, 而天线轴所指的方位角(或俯仰角)即为输出信号。雷达接收机是测量元件, 它根据接收雷达波的回波就可得知目标的方位角(或俯仰角)的数值。当目标不在天线轴线上时, 就产生偏差信号, 此偏差信号经雷达接收机转换成电压信号送入放大器, 经放大后去控制转动天线轴的直流电动机, 使雷达天线的方位角和俯仰角改变, 直到天线轴指向目标为止。需要说明, 这里需要两套相同的随动系统分别控制天线的方位角和俯仰角。

例1-2 火炮随动系统。

火炮随动系统的任务是控制火炮跟踪敌机, 以便适时开炮击中目标。其原理线路如图1-9所示。

图中一对自整角机组成测角线路。自整角发送机I转轴的位置由指挥仪来控制。当炮瞄雷达已搜索到目标且目标已进入火炮射程之内时, 天线随动系统将进入自动跟踪工作状态。这时安装在天线轴上的数据传递系统, 不断地把目标的方位角(俯仰角)数据传递给指挥仪。指挥仪根据当时气候条件、炮弹在空中飞行的弹道、目标在空中移动的速度、高度等数据, 并注意到火炮和雷达站二者的方位角(俯仰角)之差, 计算出为了

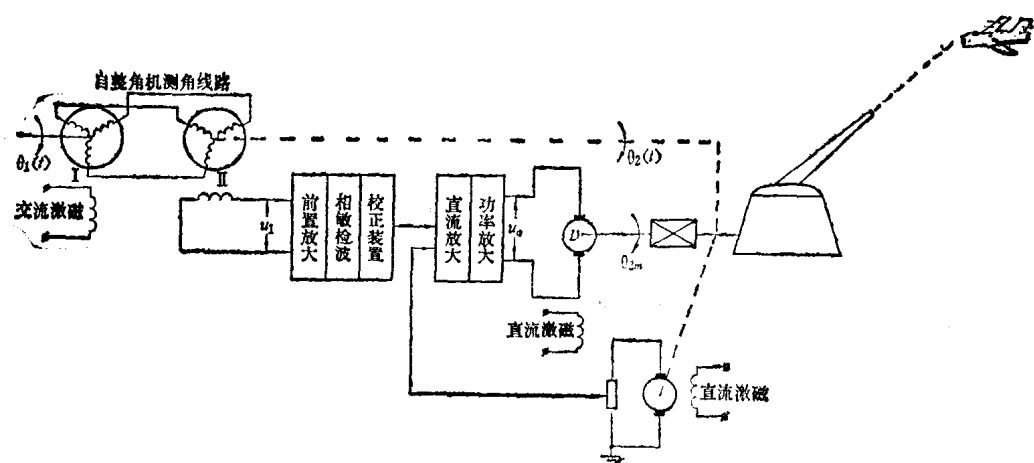


图1-9 火炮随动系统原理线路图

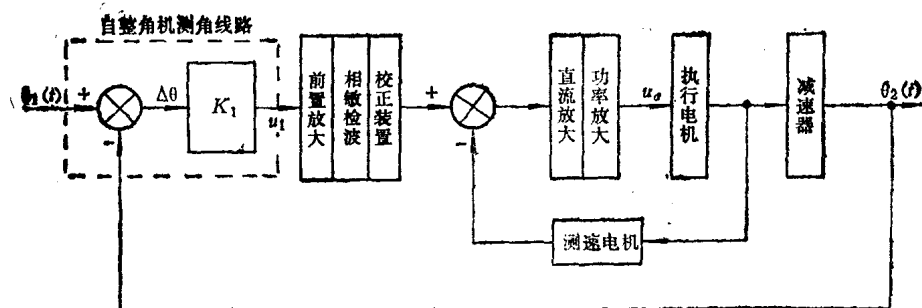


图1-10 火炮随动系统方块图

使炮弹与目标在空中相遇的火炮炮口的方位角(俯仰角)应有的数值 $\theta_1(t)$ ，这个 $\theta_1(t)$ 就是火炮随动系统的控制信号。这里需要两套相同的随动系统分别控制火炮的方位角和俯仰角。其工作原理与天线随动系统工作在搜索状态时完全相同，这里不再重述。

火炮随动系统方块图如图1-10所示。

例1-3 位置控制电液伺服系统。

图1-11为一控制工作台位置的电液反馈控制系统的原理图。该系统的目的是控制工作台的位置，使之按指令电位器给定的规律变化。

在图1-11所示系统中，用一对电位计组成测量线路。它测量指令电位计滑臂转角 $\theta_1(t)$ 与接收电位计滑臂转角 $\theta_2(t)$ 之间的角差(偏差信号)，并转换成相应的电压，即 $u = K_1(\theta_1 - \theta_2) = K_1\Delta\theta$ 。其中，接收电位计的转轴与反应工作台位置的齿轮转轴相固联(见图1-11)。当 $\theta_1(t) = \theta_2(t)$ 时， $\Delta\theta = 0$ ，即没有偏差信号，工作台处于静止状态。若改变指令电位计滑臂的位置，使偏差信号 $\Delta\theta$ 不为零，电压 u 亦不为零，经放大器放大后变为电流信号去控制伺服阀，伺服阀便输出压力液压油，使液压缸活塞推动工作台移动，以减小偏差，直到与工作台位置相对应的接收电位计的滑臂转角 $\theta_2 = \theta_1$ 时，偏差信号为零，伺服阀恢复零点而不再输出压力油，液压缸活塞停止运动，于是工作台达到了控制信号 $\theta_1(t)$ 所规定的位置。如果指令电位计滑臂位置 $\theta_1(t)$ 不断改变，则

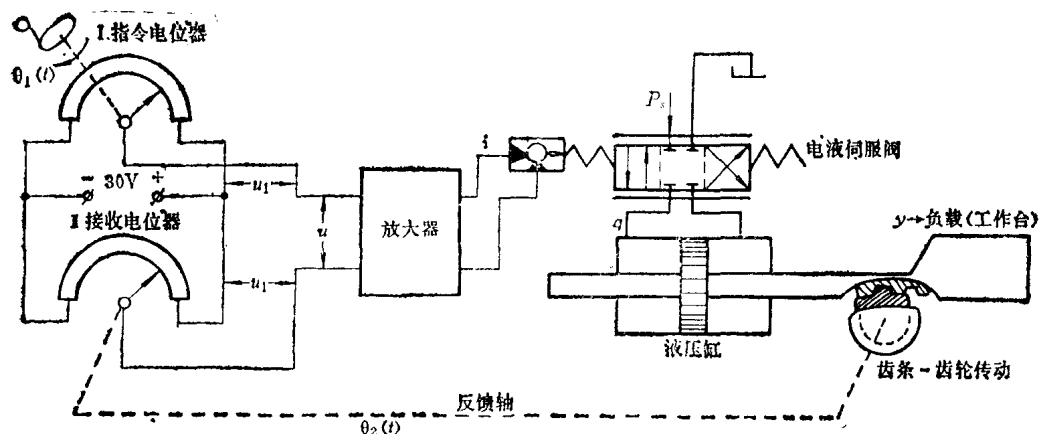


图1-11 位置控制电液伺服系统

工作台位置也跟着不断变化。

系统方块图如图1-12所示。

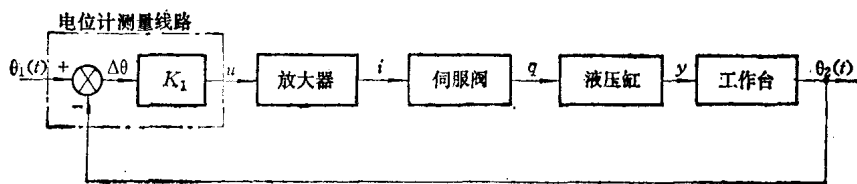


图1-12 位置控制电液伺服系统方块图

二、定值调节系统

如果反馈控制系统的控制信号 $r(t)$ 为恒定的常量，即 $r(t)=\text{常量}$ （特殊情况下为 $r(t)=0$ ），则称这类反馈控制系统为定值调节系统。

例1-4 电动机转速控制系统。

图1-13所示为电动机转速控制系统的原理线路图。它的任务是控制直流电动机以恒定的转速 n_0 带动负载工作。直流电动机是该系统的被控对象。

图1-13中测速发电机C是测量元件，它测量电动机的转速并转换成相应的电压，其输出电压正比于转速 n ，即 $u_s = K_s \cdot n$ ，经电位计 W_3 取出 u_s 的一部分 u_2 反馈到系统的控制端， u_2 为系统的反馈信号。

电压 u_1 是通过电位计 W_1 给出的基准电压，其设置值与电动机要求维持的转速 n_0 相对应， u_1 是系统的控制信号。控制信号 u_1 与反馈信号 u_2 在控制端进行比较，产生偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ ，实现对电动机转速 n 的自动控制。

图1-13中反馈校正装置是为了使本系统能稳定工作并满足一定的性能指标要求而加入的。此问题在第七章要详细研究。

下面简要说明系统的工作原理：

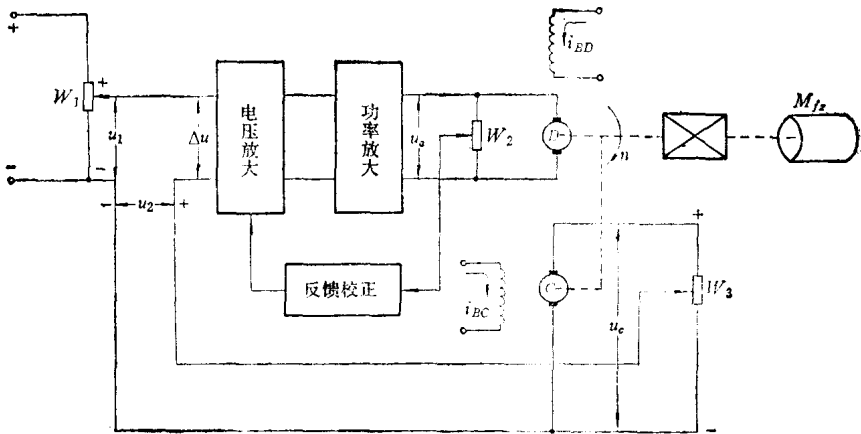


图1-13 电动机转速控制系统

假设电动机转速控制系统已调好，其相应的参数值为： $n = n_0$ ， $u_2 = u_{20}$ ， $\Delta u = u_1 - u_{20} = \Delta u_0$ ， Δu_0 经放大得电动机电枢电压 $u_a = u_{a0}$ ，在此 u_{a0} 的作用下电动机转速维持恒定不变。

由于负载力矩 M_{fz} 的变化，引起电动机转速的变化（此时认为激磁电流 i_{BD} 、 i_{BC} 均维持恒定）。这时系统中信号的变化及传递过程表示如下：

$M_{fz} \uparrow \rightarrow n \downarrow (n < n_0) \rightarrow u_2 \downarrow (u_2 < u_{20}) \rightarrow \Delta u \uparrow (\Delta u > \Delta u_0) \rightarrow u_a \uparrow (u_a > u_{a0}) \rightarrow n \uparrow$ ，直到电动机转速恢复到接近 n_0 时，系统参数不再变化，电动机便维持在接近 n_0 的一个常值上，从而完成了使电动机转速在要求的精度下维持恒定的控制过程。

按信号传递过程把电动机转速控制系统用方块图表示如图1-14所示。

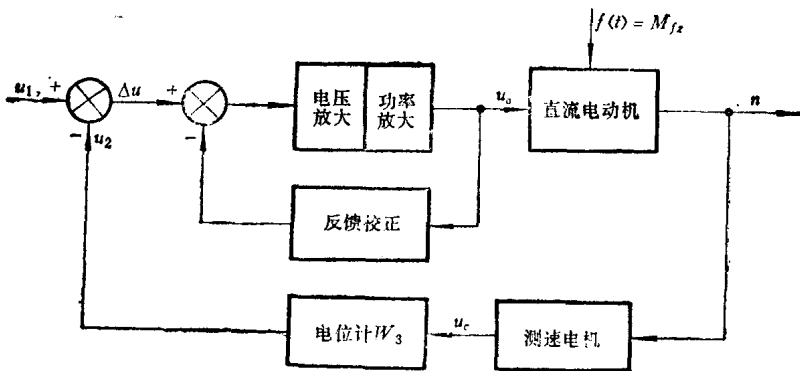


图1-14 电动机转速控制系统方块图

例1-5 焊丝给送控制系统。

焊丝给送控制系统的原理线路图如图1-15所示。

为了说明焊丝给送控制系统的工作原理，首先介绍一下自动焊接的过程。如图1-15所示，焊丝由焊丝给送滚轮经导电嘴送往焊接电弧区。焊接电源的两极分别接在导电嘴（正极）和焊件（负极）上。两极之间形成电弧。这电弧一方面把被焊物在电弧附近的

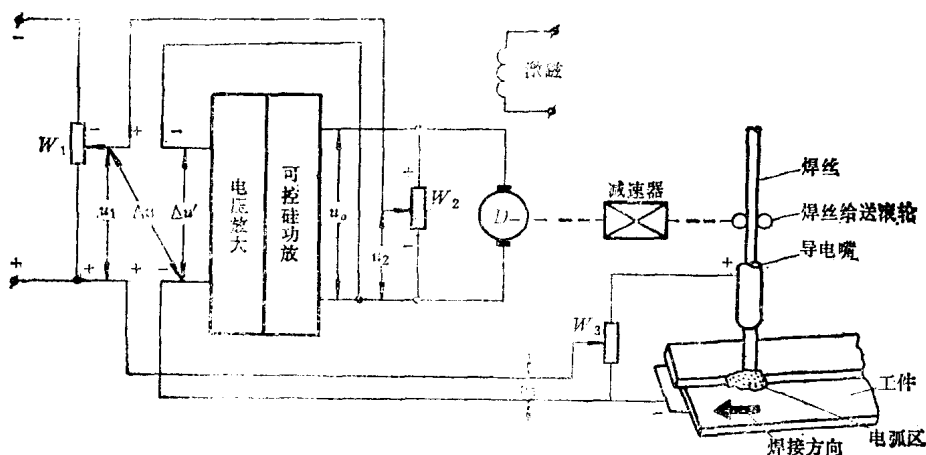


图1-15 焊丝给送控制系统原理图

那一部分烧熔化，另一方面将焊丝烧熔化，并以滴状落下，与焊件被熔化的液态金属混合，经冷却而凝固，形成焊缝，完成焊接任务。焊接时，启动焊接按钮，焊接过程便可自动进行。随着焊接过程的进行，电弧向前移动（这要由另一套自动控制系统去完成）。

在整个焊接过程中，电弧长度（即电弧电压）是一个重要的参数。电弧长度能否保持恒定，将直接关系到焊缝的质量。电弧长度是这个系统的被控制信号，在焊接过程中对它的变化规律要严加控制。

焊丝给送控制系统的任务就是通过改变焊丝给送速度实现焊接过程中电弧长度保持恒定的要求。它是一个位置控制系统。

焊接电源的外特性如图1-16所示。电弧相当于一个非线性电阻作为负载加在电源两极间。当电弧长度改变时，电弧电阻亦改变，从而使电弧电压发生变化。所以在这个系统中电弧电阻是测量转换元件，它测量电弧长度并转换成电弧电压信号，经电位计 W_3 取出一部分 (u_3) 反馈到系统的控制端。电压 u_3 是系统的反馈信号。当电弧长度增加时（即电弧电阻值增加），使电弧电流下降，电弧电压上升。反之，若电弧长度下降（即电弧电阻值下降），电弧电流上升，使电弧电压下降。

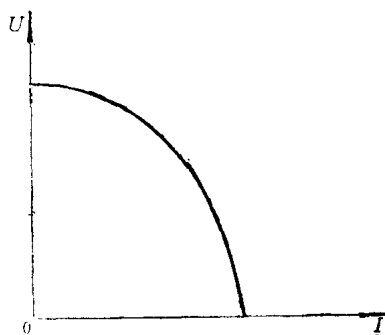


图1-16 焊接电源外特性

图1-15中 u_1 是由电位计 W_1 给出的基准电压，其设置值与所要求的电弧长度相对应。 u_1 是本系统的控制信号。

现在来说明这个系统的工作原理。设某一时刻系统处于平衡工作状态，电弧长度保持在 l_0 ，与此对应的电弧反馈电压为 u_{30} 。反馈信号 u_{30} 与 u_1 （在此系统中 u_{30} 的设置值高于 u_1 的设置值）比较后得偏差信号 $\Delta u_0 = u_{30} - u_1$ ，经放大器放大后就是加在直流电动机的电枢两端的控制电压 u_{a0} 。在 u_{a0} 的作用下，电动机以恒定转速 (n_0) 旋转。如果上述参数均不变化，电弧长度亦不会变化，始终保持为 l_0 。

实际上，常常有干扰信号作用在电动机上，如负载转矩变化（由焊丝弯曲变形等原

因造成)、电网电压波动及放大器参数变化等,都将引起电动机转速的变化,使送丝速度变化,从而引起电弧长度变化,使系统的平衡工作状态受到破坏。设由于焊丝弯曲使电动机负载转矩增加,引起电动机转速下降(即 $n < n_0$),即送丝速度下降,使焊丝熔化减慢,电弧拉长($l > l_0$),电弧电压上升($u_3 > u_{30}$),进而使偏差信号 $\Delta u = u_3 - u_1$ 上升($\Delta u > \Delta u_0$),控制电动机转速上升,即加快送丝速度,使焊丝熔化加快,电弧长度缩短,直到电动机转速重新回到 n_0 ,电弧长度恢复到 l_0 时,系统参数便不再变化,又回到原平衡工作状态,从而完成了控制电弧长度维持恒定的控制任务。

如果因某种原因使负载转矩 M_{fx} 下降,其信号的传递及变化过程可表示如下:

$M_{fx} \downarrow \rightarrow n \uparrow (n > n_0) \rightarrow l \downarrow (l < l_0) \rightarrow u_3 \downarrow (u_3 < u_{30}) \rightarrow \Delta u = (u_3 - u_1) \downarrow (\Delta u < \Delta u_0) \rightarrow u_a \downarrow (u_a < u_{a0}) \rightarrow n \downarrow \rightarrow l \uparrow$,直到 $n = n_0$, $l = l_0$ 时系统参数停止变化又完成一个控制过程,使电弧长度仍维持在恒定值 l_0 上。

系统中还有一个局部反馈信号 u_2 ,即将电枢电压 u_a 的一部分从放大器的输出端反馈到放大器的输入端,它是一个负反馈。 u_2 的作用是使放大器的输出特性变硬(减少放大器负载变化对放大器输出电压的影响),间接起到稳定电动机转速的作用,亦即起稳定电弧长度的作用。

按照信号传递过程,将焊丝给送控制系统用方块图表示如图1-17所示。

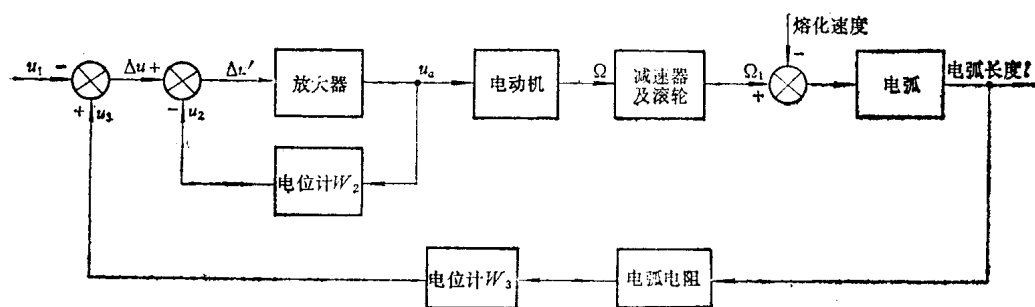


图1-17 焊丝给送控制系统方块图

例1-6 温度控制系统。

在§1-1中曾介绍一个线性炉温自动控制系统,现在再介绍一个图1-18所示的非线性炉温自动控制系统。前者耗电多,后者耗电少。当对温度控制精度要求不高时,建议采用后者。

图1-18中,用220伏交流电源给电炉加温,在电阻丝回路中接有两个并联的继电器触点 J_{11} 与 J_{12} 。其中 J_{11} 是常闭触点, J_{12} 是常开触点。系统的测温元件是用半导体热敏电阻做的热敏电阻温度计(见图1-19)。热敏电阻的阻值随着自身温度的变化而变化,它具有负的电阻温度系数,温度每升高 1°C (以 20°C 为参考点)时,其阻值下降 $2 \sim 6\%$ 。这个特性正好可以用来测量温度。把热敏电阻(有球状、圆片状及圆筒状等)嵌在玻璃管的顶端可制成灵敏度很高的半导体点温度计。用热敏电阻温度计测温时,把它放入炉膛,热敏电阻 R_t 作为电桥的一个臂接入电桥。当炉内温度达到要求值 T_0 (如 $T_0 = 150^\circ\text{C}$)时,热敏电阻阻值为 R_{t0} ,这时调节电阻 R_p 使电桥平衡,即 $\Delta u_{11} = 0$,经放大后的信号 u_{11} 亦为零,继电器线圈 J_{11} 中无信号,继电器不动作,触点 J_{11} 仍闭合,维持炉内温度为